

## 大型复杂钛合金边梁零件热成形工艺研究

## Research on Hot Forming of Large-Complex Beam Part of TC4 Titanium Alloy

首都航天机械公司 王大刚 贾春莉 杨微 梁阔 王景苑 房玉华

**[摘要]** 针对某航天飞行器大型钛合金边梁零件的成形进行了工艺仿真。以控制零件的减薄率为最终目标,采用正交试验方案,对凸模摩擦系数、凹模圆角半径、凸凹模间隙、成形温度等工艺参数进行了优化,并利用自行设计的模具进行工艺试验,最终得到了合格的边梁产品。

**关键词:** TC4 钛合金 热成形 数值模拟

**[ABSTRACT]** In this paper, hot forming process of a space vehicle large-complex beam part is simulated. In view of material thinning ratio, the punch friction coefficient, die radius, die clearance, and temperature parameters are optimized by orthogonal experiment. Meanwhile, large-complex beam parts are formed by using of self-designed mold. Finally the qualified products are obtained.

**Keywords:** TC4 titanium alloy Hot forming Numerical simulation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.120

钛合金结构零件因其重量轻、比强度高、耐腐蚀、耐高温、无磁性、可焊接等优异的综合性能,首先在航空领域得到广泛应用,如机翼蒙皮、发动机的叶片、机身的框架等。最近几年钛合金在航天器以及导弹中也被大量应用。但钛合金材料冷成形时的塑性变形能力差、成形抗力较大、回弹严重,常温成形困难,一般采用热成形制造钛合金钣金结构件。热成形是充分利用钛合金材料在加热状态下的软化与蠕变性能,提高塑性,以降低成形力和改善成形性、避免开裂、减少回弹。加热成形是目前钛及钛合金零件成形的最主要方法<sup>[1]</sup>。

采用有限元法可在试验之前对影响热成形的工艺参数进行优化,估算板料在成形过程中的应力、应变的变化及分布,所需成形的载荷情况;也可预测成形过程中的起皱、破裂及随后的回弹等缺陷;可以比较准确地分析各种工艺参数对热成形过程的影响,因此越来越多地应用于工程实践中<sup>[2-3]</sup>。

## 1 零件成形性分析

边梁零件用于某型号航天飞行器中,该零件左右对称,采用TC4钛合金材料,壁厚2mm,其长度达2.2m,在

零件中部弯曲过度,两侧边存在扭曲,属于大型复杂钛合金构件,如图1所示。零件成形难度主要有两点:一是侧壁在零件中部弯曲部位出现褶皱,此部位在成形过程中受到两侧压应力作用,材料容易在此堆积而出现褶皱;二是侧壁存在回弹,其两侧壁受其他部位约束少,在热状态下,由于受模具的限制能够保持型面,而当零件从模具中取出后,在降温过程中两侧壁呈自由状态,内应力逐渐释放,因此会呈现不同程度的回弹,最终导致产品型面尺寸精度较差。因此为得到尺寸精度高、表面质量好的零件,先采用有限元数值模拟进行工艺参数的优化及模具回弹补偿量计算,然后设计制造模具,最终成形出合格零件。

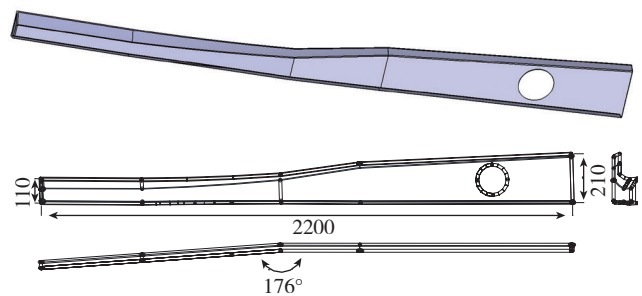


图1 边梁模型及尺寸

Fig.1 Model and size of beam

## 2 有限元数值模拟

由于拟定的实际加工环境为恒温环境,在数值模拟中不考虑因温度差而产生的温度场,温度的改变对成形的影响由改变材料模型来实现,几何模型的尺寸根据实际材料的热膨胀量而调整。

### 2.1 模型的建立

采用三维设计软件CATIA建立凸模、凹模和板料模型,然后将模型导入ABAQUS,假定模具为刚体,板料则为可变性壳体,并对凸凹模及板料进行网格划分,板料单元类型采用四节点四边形壳单元S4R,最终得到的模型如图2所示。

### 2.2 材料模型

材料模型参数由高温单向拉伸试验结果给出,其中材料密度为4.5g/cm<sup>3</sup>,泊松比为0.3。

### 2.3 边界条件及接触定义

对凹模施加固定约束,凸模施加位移约束。设定板

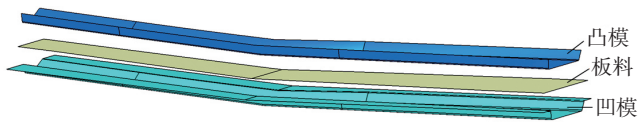


图2 热成形几何模型

Fig.2 Geometric model of hot forming

料为接触变形体,模具为离刚体,板料和模具间为干摩擦,符合库伦摩擦定理,材料和模具之间不能穿透<sup>[4-5]</sup>。

### 2.4 模拟结果

针对影响成形的工艺参数,包括凸模摩擦系数、凹模圆角半径、凸凹模间隙、成形温度,以材料的减薄率为设计目标,设计4因素3水平的正交实验方案,试验计划表如图3所示,对电缆罩不同工艺参数下的成形过程进行了有限元分析。

实验计划表	1	2	3	4
因素	凸模摩擦系数	凹模圆角半径	凸凹模间隙	成形温度
实验1	0.1	3	1t	650℃
实验2	0.1	5	1.1t	700℃
实验3	0.1	7	1.15t	750℃
实验4	0.2	3	1.1t	750℃
实验5	0.2	5	1.15t	650℃
实验6	0.2	7	1t	700℃
实验7	0.3	3	1.15t	700℃
实验8	0.3	5	1t	750℃
实验9	0.3	7	1.1t	650℃

图3 正交试验方案表

Fig.3 Orthogonal test table

以减薄率为设计目标得到正交实验极差结果,极差结果显示各因素对成形减薄率的影响程度的大小,其中成形温度对减薄率的影响最大,其次为凹模圆角半径,凸模摩擦系数和凸凹模间隙影响差不多。通过对几种模拟结果的分析及权衡,最终选定的工艺参数如下:温度700℃、凸凹模间隙1.1t、凹模圆角半径为5mm、凸模摩擦系数0.2,此工艺参数下模拟结果如图4所示。从图中可以看出在零件中部弯曲位置的侧壁出现了褶皱,褶皱虽然处于零件工艺余量上,但是会对零件本身产生影响,因此为了避免此位置起皱,下料时在此位置开出一缺口。从Mise应力图上可以看出,最大应力主要集中在两弯曲边根部,而从壁厚分布图上可以看出,

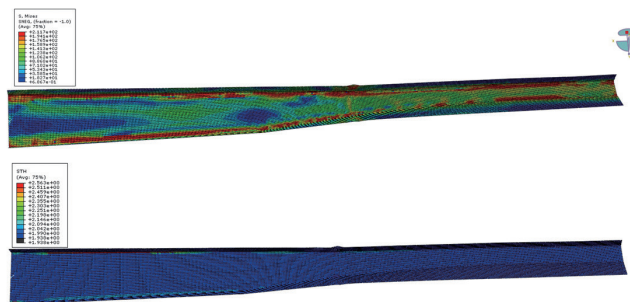


图4 数值模拟结果

Fig.4 Results of numerical simulation

成形后零件壁厚均匀,减薄量很小,最大减薄量为3%,总体成形效果良好,符合设计要求。

## 3 试验验证

### 3.1 工艺方案制定

通过有限元数值确定的工艺参数,实验选取成形温度700℃,成形压力55t,保温保压5min,实验在1200t精密热成形机上进行。结合数值模拟得出的凸凹模间隙及模具回弹补偿量,并考虑模具材料及钛合金的热膨胀系数,设计并制造模具,模具三维模型如图5所示。

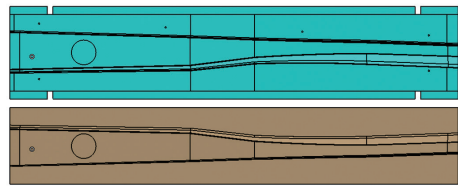


图5 模具三维模型

Fig.5 3D model of mould

### 3.2 试验结果

在数值模拟给定的毛料基础上,在模拟结果中起皱位置开缺口,在模具上面涂覆氮化硼做为润滑剂,然后进行试验,成形后的零件如图6所示,从图中可以看出,零件表面质量好,不存在起皱。



图6 成形后的边梁零件

Fig.6 Beam part after hot forming

在零件上选取了7个典型截面,并制造了切面内样板,对成形的4个零件型面进行检验,分别记录了零件7个不同截面位置直边和斜边与样板的间隙,检验结果见表1。通过对表中的数据进行分析,可以看出成形的零件精度较高,与样板最大间隙为0.2mm,证明选取的工艺参数合理。

表1 零件与样板间隙实测结果

		位置1	位置2	位置3	位置4	位置5	位置6	位置7
1#	斜边	0	0.15	0.15	0	0	0	0
	直边	0.08	0	0	0	0	0	0
2#	斜边	0	0	0.1	0	0.1	0	0.09
	直边	0.1	0	0	0	0	0	0
3#	斜边	0	0.1	0.1	0.15	0.1	0	0.09
	直边	0.2	0	0	0	0	0	0
4#	斜边	0	0.15	0.2	0	0.1	0	0.1
	直边	0.05	0	0.1	0	0	0	0.1

(下转第130页)

特征具有一致性,受纵向体积收缩不均匀的影响,拉应力与压应力交替分布。

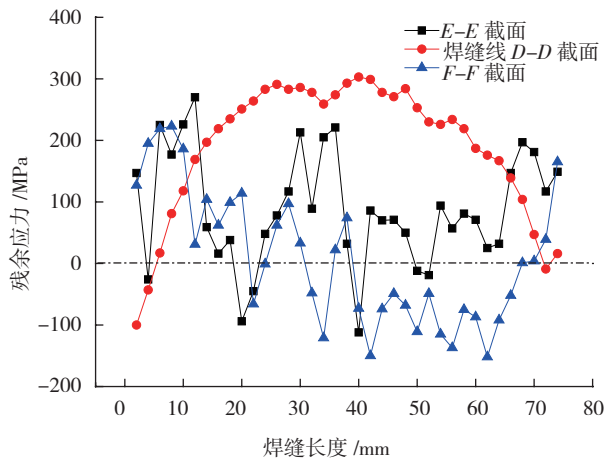


图7 平行焊缝方向残余应力

Fig.7 Residual stress distribution in longitudinal direction

### 3 结论

(1) 热机影响区内的  $\alpha$  相和  $\beta$  转变体在线性摩擦焊接过程中被不同程度地拉长,变形严重,组织呈现清晰的流线和带状组织。焊缝区存在超细晶粒区,显微组织由细小的片状  $\alpha$  相和  $\beta$  相组成,是原始  $\beta$  晶粒在应力和变形的共同作用下发生动态再结晶,进而限制了片层状  $\alpha$  的生长而形成。

(2) 垂直于焊缝的横截面上,垂直焊缝方向的残余应力在焊缝中心和焊缝端部分别呈现 V 字形和 W 字形分布特征,而在焊缝纵截面上,平行焊缝方向的残余应力分布特征为中心段存有较高的残余拉应力,至焊缝两端逐渐下降为压应力。

### 参考文献

- [1] 黄旭,朱知寿,王红红.先进航空钛合金材料与应用.北京:国防工业出版社,2012.
- [2] Wanjara P, Jahazi M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property inter-relationships. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(8): 2149-2164.
- [3] 朱剑桥,张彦华,张田仓,等.振幅改变对 TC4 线性摩擦焊接头微观缺陷特征的影响.焊接学报, 2014, 35(3): 105-108.
- [4] 姬书得,刘建光,陶军,等. TC4 钛合金线性摩擦焊过程材料流动行为分析.北京理工大学学报, 2013, 33(7): 689-693.
- [5] Mateo A, Corzo M, Anglada M, et al. Welding repair by linear friction in titanium alloys. Materials Science and Technology, 2009, 25(7): 905-913.
- [6] Karadge M, Preuss M, Withers P J, et al. Importance of crystal orientation in linear friction joining of single crystal to polycrystalline nickel-based superalloys. Materials Science and Engineering: A, 2008, 491(1-2): 446-453.
- [7] Mary C, Jahazi M. Multi-scale analysis of IN-718 microstructure evolution during linear friction welding. Adv Eng Mater, 2008, 10(6): 573-578.

[8] KARADGE M, PREUSS M, LOVLESS C, et al. Texture development in Ti-6Al-4V linear friction welds. Materials Science and Engineering A, 2007, 459(1-2): 182-191.

[9] Daymond M R, Bonner N W. Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction. Physica B, 2003, 325: 130-137.

[10] Romero J, Attallah M M, Preuss M, et al. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds. Acta Mater, 2009, 57: 5582-92.

[11] 陈燕,赵秀娟,刘鹏涛,等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头的组织与硬度分析.理化测试, 2012, 48(7): 435-438.

[12] Zhang C C, Zhang T C, Ji Y J, et al. Effects of heat treatment on microstructure and microhardness of linear friction welded dissimilar Ti alloys. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2013 (23): 3540-3544.

[13] 张彦华.焊接力学与结构完整性原理.北京:北京航空航天大学出版社,2007:137-138.

[14] Song X, Xie M, Hofmann F, et al. Residual stresses in linear friction welding of aluminium alloys. Materials and Design, 2013, 50: 360-369.

[15] Rossini N S, Dassisti M, Benyounis K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components. Materials and Design, 2012, 35: 572-588.

[16] Venkata R P, Madhusudhan R G, Mohandas T, et al. Microstructure and residual stress distribution of similar and dissimilar electron beam welds-maraging steel to medium alloy medium carbon steel. Mater Design, 2010, 31(2): 749-760.

[17] Estefen S F, Gurova T, Castello X, et al. Surface residual stress evaluation in double-electrode butt welded steel plates. Mater Design, 2010, 31(3): 1622-1627.

(责编 玲犀)

(上接第 121 页)

### 4 结论

(1) 进行热成形有限元数值模拟能科学快捷地预测成形缺陷,优化模具型面与工艺参数,对实际生产有很强的指导意义。通过对 TC4 钛合金复杂边梁零件的热冲压成形工艺仿真,获得了合理的模具设计依据及工艺参数,具有很大的参考价值。

(2) 通过试验研究及工艺优化,获得了 TC4 钛合金边梁零件热成形工艺参数,并且通过毛料形状优化,消除了零件起皱,对此类零件的成形具有指导意义。

### 参考文献

- [1] 理有亲,林兆荣,陈春奎,等.钛板冲压成形技术.北京:国防工业出版社,1986.
- [2] 杨伟俊,李东升,李小强,等.复杂形状钛合金热成形零件工艺仿真及参数优化研究.塑性工程学报, 2009, 16(1): 42-46.
- [3] 张涛,李琦,何露,等. TC2 钛合金异型件热成形工艺研究.航空制造技术, 2011, 16: 57-59.
- [4] 郭天文. TC4 钛合金板材热拉深成形数值模拟与试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008: 17-34.
- [5] 徐清华. TC4 合金大型筒构件成形工艺的数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012: 24-25.

(责编 叶枫)